



Radars FMCW pour l'aide à la conduite automobile

Ali Bazzi, Thierry Chonavel, Camilla Kärnfelt, Alain Peden, Frantz Bodereau

► To cite this version:

Ali Bazzi, Thierry Chonavel, Camilla Kärnfelt, Alain Peden, Frantz Bodereau. Radars FMCW pour l'aide à la conduite automobile. [Rapport de recherche] Dépt. Signal et Communications (Institut Mines-Télécom-Télécom Bretagne-UEB); Dépt. Micro-Ondes (Institut Mines-Télécom-Télécom Bretagne-UEB); Autocruise (Autocruise); Laboratoire en sciences et technologies de l'information, de la communication et de la connaissance (UMR CNRS 6285 - Télécom Bretagne - Université de Bretagne Occidentale - Université de Bretagne Sud). 2010, pp.8. hal-01185681

HAL Id: hal-01185681

<https://hal.science/hal-01185681>

Submitted on 21 Aug 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Radars FMCW pour l'aide à la conduite automobile

**Ali BAZZI* – Thierry CHONAVEL* – Camilla KÄRNFELT* –
Alain PEDEN* – Frantz BODEREAU****

** Institut TELECOM ; TELECOM Bretagne
UMR CNRS 3192 Lab-STICC
Technopôle Brest Iroise CS 83818,
29238 Brest Cedex 3
prénom.nom@telecom-bretagne.eu*

*** Autocruise S.A., France
prénom.nom@trw.com*

RÉSUMÉ. Dans cet article, on analyse deux stratégies de choix de forme d'onde pour un radar FMCW d'aide à la conduite automobile. La présence potentielle de plusieurs cibles nécessite l'utilisation de formes d'onde spécifiques en vue d'associer correctement les fréquences de battement sur chaque rampe. On étudie ici les performances obtenues en termes de variance de position et de vitesse relative pour deux stratégies possibles d'un point de vue pratique et on présente également les bornes théoriques correspondantes. On trouve que les formes d'onde proposées permettent de gérer la présence de cibles multiples et donnent de bonnes performances pour un seuil de détection de l'ordre de 15 dB.

ABSTRACT. In this paper, we study two FMCW radars designs for automatic cruise control. The possible presence of multiple targets implies using specific waveforms to ensure a correct beat frequencies association. Here, we consider the performance of two such waveforms in terms of variance for targets distance and relative velocity estimators. Our study is based on theoretical bounds derivation as well as on realistic simulations. We check that the proposed waveforms achieve good multitarget management and good performance for an SNR threshold around 15 dB.

MOTS-CLÉS : Radar d'aide à la conduite, forme d'onde, FMCW, bornes de performance, estimation des paramètres, borne de Barankin.

KEYWORDS: Automatic Cruise Control (ACC), radar waveform, FMCW, variance bounds, parameter estimation, Barankin bound.

1. Introduction

En général dans le domaine des radars, et en particulier dans le domaine des radars d'aide à la conduite (radars ACC : Automatic Cruise Control) on est confronté au problème de la détection de cibles multiples et à celui de l'estimation de leur distance et de leur vitesse. Dans cet article, on présente deux stratégies de type FMCW qui permettent de suivre plusieurs cibles.

Les radars FMCW possèdent plusieurs avantages : ils sont peu coûteux, peu encombrants et font appel à des technologies bien maîtrisées. Ils sont en particulier capables de générer des ondes de bande passante élevée sans pour autant nécessiter des vitesses de traitement numérique élevées. Ainsi, des radars de quelques GHz de bande passante pourront fonctionner avec des vitesses d'échantillonnage en bande de base de seulement quelques centaines de kHz.

Un radar FMCW émet plusieurs rampes de fréquences (Levanon, 2004). L'emploi de rampes identiques est généralement mal adapté au dimensionnement d'un radar pour l'automobile et on préfère employer des rampes de pentes distinctes. Pour chaque rampe, l'onde émise sert également à démoduler l'onde renvoyée par les cibles. Ainsi, chaque cible fournit une fréquence de battement dont la valeur est une combinaison linéaire de la distance et de la vitesse relative de la cible. En associant les fréquences de battement de plusieurs rampes on peut identifier la position et la vitesse relative des cibles. Malheureusement, cette association des fréquences de battement peut s'avérer délicate compte tenu du fait que leur ordonnancement peut changer d'une rampe à l'autre, d'où la nécessité d'adapter des stratégies qui permettent une bonne association en présence de cibles multiples.

Comme indiqué dans (Miyahara, 2004), l'utilisation de rampes avec des pentes légèrement différentes tend à préserver l'ordre des trajets. Nous avons cependant vérifié que cette méthode présente l'inconvénient de présenter une variance très élevée pour la vitesse relative estimée. Par suite, on a proposé l'association de rampes de pentes faiblement différentes destinées à aider l'association des cibles, avec des rampes de pentes opposées afin d'obtenir de bonnes précision en distance et en vitesse. Cependant, comme il n'est pas toujours facile avec du matériel à faible coût de fabriquer des rampes avec des pentes très légèrement différentes, on considère également ici une approche alternative pour résoudre ce problème. Elle consiste à transmettre une sinusoïde pure ainsi que deux rampes, de pentes franchement distinctes. Les deux formes d'onde indiquées ci dessus seront nommées respectivement "FMCW double" et "FMCW avec sinusoïde pure".

Dans cet article, on s'intéresse à l'étude des stratégies présentées ci dessus. On propose des techniques d'association des fréquences de battement et d'estimation des paramètres des cibles. On montre en particulier la cohérence que l'on peut espérer obtenir entre les bornes théoriques très classiques de Cramer-Rao (Rao, 1945) (Cramér, 1946) ou les bornes plus réalistes de Barankin (Barankin, 1949) et les variances des estimateurs de position et de vitesse que l'on a proposé. Ces courbes fournissent en particulier une stratégie de seuillage pour la détection des cibles.

2. Formes d'onde et estimation des paramètres

2.1. FMCW double

La référence (Miyahara, 2004) présente une forme d'onde pour laquelle l'évolution de la fréquence en fonction du temps se présente une succession de rampes de pentes légèrement différentes. L'auteur montre que, pour une telle forme d'onde, l'ordre dans lequel les fréquences de battement sont arrangées sur la première rampe est identique à l'ordre obtenu sur la seconde rampe. Ainsi, l'association des fréquences de battement entre les rampes est facile et l'ambiguïté présente dans l'utilisation de la forme FMCW classique constituée d'une rampe montante et d'une rampe descendante est évitée. Malheureusement, cette méthode conduit à une mauvaise estimation de la vitesse (Miyahara, 2004).

L'association simplifiée entre les fréquences de battement constitue cependant un grand avantage de cette forme d'onde et nous l'avons retenue pour la définition d'une forme d'onde plus avancée. En associant l'idée de rampes de pentes proches et celle de rampes de pentes opposées, on propose une forme d'onde, nommée "FMCW double", composée de deux "triangles" FMCW successifs avec des pentes légèrement différentes entre le premier et le deuxième triangle. L'ordre des fréquences de battement des cibles est ainsi préservé entre les deux rampes montantes, de même qu'entre les deux rampes descendantes. L'association des fréquences de battement demeure simple et la variance de l'estimation de la vitesse reste faible, grâce à la prise en compte, dans un second temps, des rampes de pentes opposées.

La structure de la forme d'onde double FMCW est résumée sur la Fig. (1). Elle est caractérisée par quatre paramètres :

- La fréquence porteuse (f_0)
- La bande passante (B)
- La durée totale (T)
- La durée du premier triangle (θ)

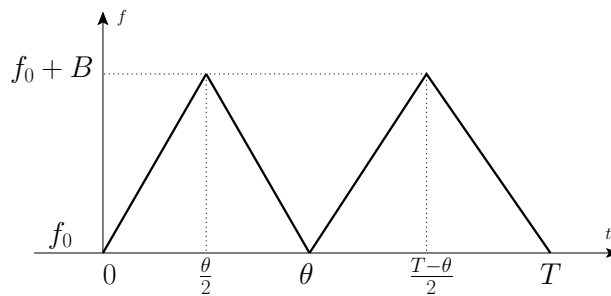


Figure 1. La forme d'onde "FMCW double".

L'algorithme d'association des fréquences de battement est décrit ici pour un récepteur assurant la démodulation en phase et en quadrature. Notons cependant qu'il peut être facilement adapté au cas d'un récepteur ne réalisant la démodulation que sur une seule voie, ce qui permet d'envisager la fabrication de systèmes à faible coût fonctionnant avec cette forme d'onde. Il en résultera cependant une procédure d'estimation un peu plus lourde compte tenu de la duplication des fréquences, du fait du spectre paire des signaux réels. Les fréquences de battement des cibles sont obtenues par seuillage du périodogramme (Kay, 1988) du signal reçu démodulé, calculé pour chaque rampe. f_i^{upk} représente la $i^{\text{ème}}$ fréquence détectées sur le $k^{\text{ème}}$ ($k = 1, 2$) rampe montante.

On commence par n'estimer les distances et les vitesses relatives que pour les rampes montantes d'une part et les rampes descendantes d'autre part.

$$\begin{aligned} d_i^{up} &= (f_i^{up2} - f_i^{up1}) \frac{c\theta(T-\theta)}{4B(T-2\theta)} & d_i^{do} &= (f_i^{do2} - f_i^{do1}) \frac{c\theta(T-\theta)}{4B(2\theta-T)} \\ v_i^{up} &= \frac{c}{2f_0} \frac{(T-\theta)f_i^{up2} - \theta f_i^{up1}}{T-2\theta} & v_i^{do} &= \frac{c}{2f_0} \frac{(T-\theta)f_i^{do2} - \theta f_i^{do1}}{T-2\theta} \end{aligned}$$

Estimation sur les rampes montantes Estimations sur les rampe descendantes

[1]

En se basant sur ces estimations, on cherche des combinaisons entre les estimations sur les rampe montantes et les estimations sur les rampes descendantes pour lesquelles les écarts de distance sont les plus faibles. On obtient ainsi quatre fréquences de battement f^{up1} , f^{do1} , f^{up2} et f^{do2} pour chaque cible. On en déduit une estimation finale de la distance et de la vitesse de chaque cible en moyennant les estimateurs fournis par les couples (f^{up1}, f^{do1}) et (f^{up2}, f^{do2}) respectivement :

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{2} [(f^{do1} - f^{up1}) \frac{c\theta}{8B} + f^{do2} - f^{up2}) \frac{c(T-\theta)}{8B}] \\ v &= \frac{1}{2} [(f^{up1} + f^{do1}) \frac{\lambda}{4} + (f^{up2} + f^{do2}) \frac{\lambda}{4}] \end{aligned}$$

[2]

2.2. Forme d'onde FMCW avec sinusoïde pure

Une autre forme d'onde FMCW a été présentée dans (Miyahara, 2004), (Kok *et al.*, 2005) et (Z. Li *et al.*, 2004). Pour cette forme d'onde, une partie du signal émis est constitué d'une sinusoïde pure, le reste étant composé par une rampe montante et une rampe descendante. Les échos retournés au cours de l'émission à fréquence fixe contiennent les fréquences Doppler et donc les vitesses relatives des cibles. En outre, la connaissance des fréquences Doppler nous permet d'associer correctement les fréquences de battement sur la rampe montante et sur la rampe descendante.

Un exemple de cette forme d'onde est donné dans la Fig. 2, où on a fixé $\theta = \frac{T}{3}$.

Comme dans le cas de la forme d'onde "FMCW double", on peut effectuer un traitement avec des données complexes mais aussi avec des données obtenues sur une seule phase.

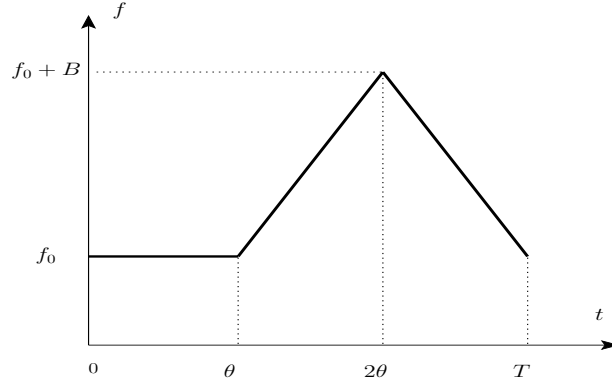


Figure 2. Forme d'onde FMCW avec sinusoïde pure

Une fréquence Doppler f_k^{pure} estimée à partir de la sinusoïde pure fournit directement la fréquence d'une cible et peut être associée à une fréquence f_i^{up} de la rampe montante et une fréquence f_j^{do} de la rampe descendante. On en déduit ainsi deux estimateurs de la distance pour la cible k . L'estimation des distances possibles des cibles est donc obtenue en considérant pour la cible k les diverses associations possibles de la forme

$$\begin{array}{ll} d_k^{up} = (f_k^{pure} - f_i^{up}) \frac{c\theta}{2B} & d_k^{do} = (f_j^{do} - f_k^{pure}) \frac{c\theta}{2B} \\ \text{Estimation de la distance} & \text{Estimation de la distance} \\ \text{sur la rampe montante} & \text{sur la rampe descendante} \end{array} \quad [3]$$

On cherche ensuite les meilleures combinaisons possibles entre les distances estimées sur la rampe montante et les distances estimées sur la rampe descendante en minimisant $\sum_{i=1}^I (d_k^{up} - d_{\sigma(k)}^{do})^2$, sur toutes les permutations $\sigma(\cdot)$ de l'ensemble $\{1, \dots, I\}$ des indices des cibles (I est le nombre des cibles).

L'association des fréquences de battement étant réalisée, les estimations des distances et des vitesses relatives des cibles peuvent être effectuées en utilisant les fréquences de battement associées, en utilisant les équations suivantes :

$$\begin{cases} d = (f^{do} - f^{up}) \frac{c\theta}{4B} \\ v = (f^{up} + f^{do}) \frac{c}{4f_0} \end{cases} \quad [4]$$

On remarque que la fréquence pure n'est pas utilisée pour le calcul de la distance et de la vitesse. On a justifié cette démarche dans (Bazzi *et al.*, 2009).

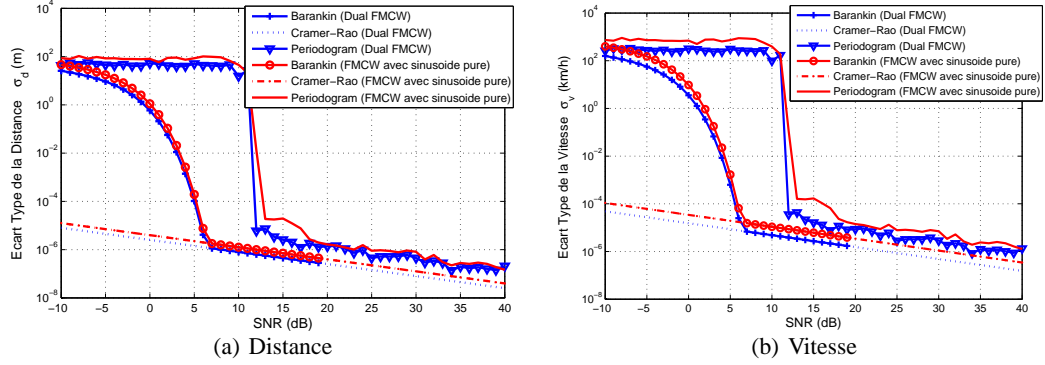


Figure 3. FMCW double et FMCW avec sinusoïde pure. Comparaison des performances pour l'estimation de la distance (a) et de la vitesse (b) ($d = 50$ m, $v = 80$ km/h).

3. Analyse des performances

Comme on l'a déjà vu, la distance et la vitesse sont des combinaisons linéaires des fréquences de battement. Sur chaque rampe, la fréquence de battement est obtenue par la détection des maxima du périodogramme. C'est une méthode standard pour l'estimation des fréquences avec l'utilisation d'un grand nombre d'échantillons. Dans nos simulations, on a prélevé environ 2000 échantillons sur chaque rampe. La durée du signal est $T = 5.12$ ms. Lorsqu'on a un grand nombre d'échantillons, le périodogramme sera une approximation de l'estimateur de maximum de vraisemblance (Kay, 1988), qui tend par ailleurs vers la borne de Cramer-Rao quand le SNR augmente.

La distance et la vitesse étant des combinaisons linéaires des fréquences de battement, leurs variances et leurs bornes de performances se calculent facilement à partir de celles des fréquences de battement. En prenant l'exemple d'une voiture, avec $d = 50$ m et $v = 80$ Km/h, on a tracé sur les figures 3(a) et 3(b) les écarts type des distances et des vitesses en fonction du SNR. On obtient une borne de Barankin ayant un seuil proche des résultats pratiques. On voit bien que les deux formes d'onde possèdent à peu près le même seuil de détection et que la forme d'onde FMCW double est un peu plus bonne que la forme d'onde FMCW avec sinusoïde pure.

Afin d'obtenir une conclusion plus générale, on considère les 35 paires (d, v) avec $d = 1, 50, 100, 150, 200$ m et $v = -180, -90, 0, 90, 180, 270, 360$ Km/h (la vitesse est comptée positivement quand la cible se rapproche). Sur les figures 4 et 5 on a tracé le maximum, le minimum et la moyenne de l'écart type, pour les deux formes d'onde FMCW double et FMCW avec sinusoïde pure. On remarque que le seuil de détection reste toujours inférieur à 15 dB et que l'écart type est inférieur à 1 m pour l'estimation de la distance et à 1 Km/h pour l'estimation de la vitesse au delà du seuil.

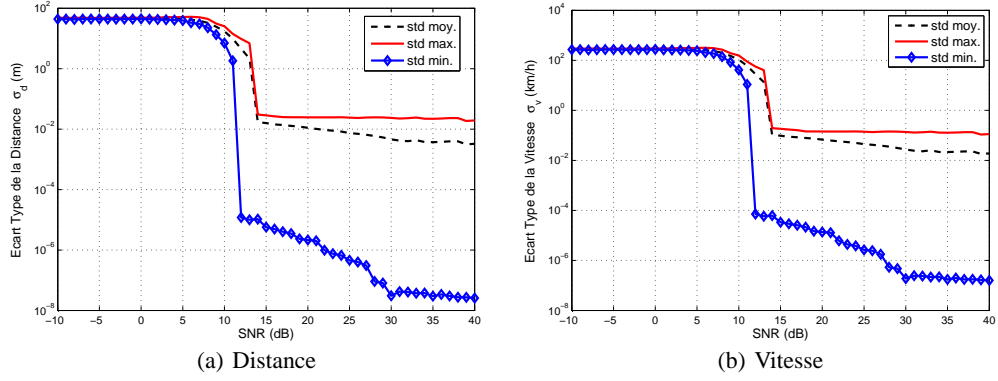


Figure 4. Ecart type (*std* : standard deviation) minimal, maximal et moyen pour l'estimation de la distance et de la vitesse pour la forme d'onde FMCW double pour les 35 paires (d,v) , avec $d = 1, 50, 100, 150, 200$ m et $v = -180, -90, 0, 90, 180, 270, 360$ Km/h.

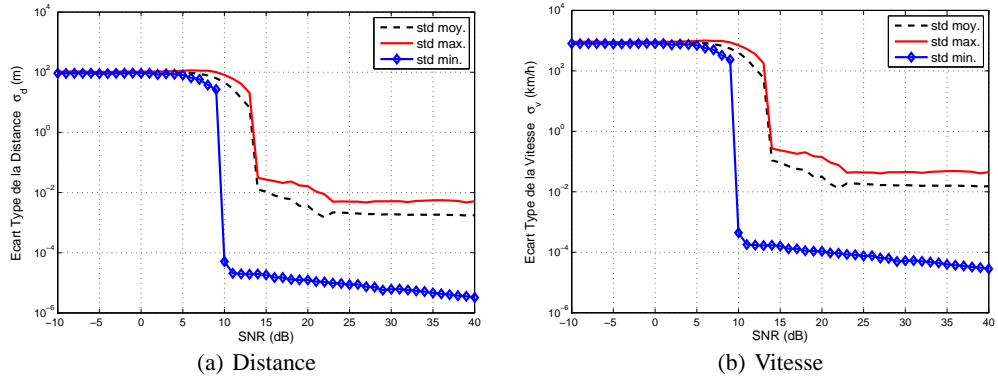


Figure 5. Ecart type (*std* : standard deviation) minimal, maximal et moyen pour l'estimation de la distance et de la vitesse pour la forme d'onde FMCW avec sinusoïde pure pour les 35 paires (d,v) , avec $d = 1, 50, 100, 150, 200$ m et $v = -180, -90, 0, 90, 180, 270, 360$ Km/h

4. Conclusion

Dans cet article, on a présenté une étude de deux formes d'onde FMCW adaptées au traitement de cibles multiples. On a calculé la borne de Cramer-Rao et celle de Barankin pour la variance de l'estimation de la distance et de la vitesse des cibles. La borne de Barankin fournit un seuil de détection qui reste d'environ 7dB en deçà de ce

que fournissent les simulations. Notons que la validité pratique des tests effectués ici sur une plateforme logicielle réalisée sous Matlab, a été corroborée par des simulations avec ADS de la tête radar. L'emploi de Matlab permet ici de réaliser des traitements avancés (association de cibles et calcul des estimateurs), là où le traitement avec ADS s'arrêterait aux sorties de l'analyse de Fourier.

5. Bibliographie

- Barankin E., « Locally best unbiased estimates », *Ann. Math. Statist.*, vol. 20, p. 447-501, December, 1949.
- Bazzi A., Chonavel T., Kärnfelt C., Péden A., Bodereau F., « Strategies for FMCW radar », *ITST 2009 : 9th international conference on Telecommunications for Intelligent Transport Systems*, 2009.
- Cramér H., *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton University, Press, New York, 1946.
- Kay S., *Modern Spectral Estimation - Theory and Applications*, Prentice Hall, 1988.
- Kok D., Fu J., « Signal processing for Automotive Radar », *IEEE International Radar Conference*, May, 2005.
- Levanon N., *Radar signals*, Wiley, New York, 2004.
- Miyahara S., « New Algorithm for Multiple Object Detection in the FMCW Radar », *SAE Technical Paper Series*, 2004.
- Rao C. R., « Information and accuracy attainable in the estimation of statistical parameters », *Bull. Calcutta Math. Soc.*, number 37, p. 81-91, 1945.
- Z. Li S.R. Lee B. W., Du Z., « Study on Reducing False Target for Automotive Radar », *Proceedings on 7th International Conference on Signal Processing(ICSP '04)*, vol. 3, Beijing, China, p. 2074-2077, October 16-19, 2004.